

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.002

秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与 降雨特征响应关系

徐 荣¹, 邓雅静², 李一平², 潘泓哲², 刘 军¹, 柏 松¹,
商鹤琴², 周玉璇², 郑婉婷²

(1. 江苏省南京环境监测中心, 江苏 南京 210041; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为分析排涝泵站前池水质与降雨特征的响应关系, 对南京市城区秦淮河沿线 2 个排涝泵站前池水质以及降水量开展高频在线自动监测, 结合回归树方法分析了不同降雨强度、前期干旱时间条件下排涝泵站前池水质变化规律, 探讨了不同类型排涝泵站前池水质的主要影响因素。结果表明: 晴雨天均有生活污水汇入的 A 泵站前池氨氮质量浓度在大雨强下降低, 中雨强下先升高后降低, 小雨强下平缓上升, A 泵站前池污染物质量浓度主要受降雨强度和次降水量影响; 主要接收降雨径流, 雨量大时有生活污水溢流汇入的 B 泵站, 前池污染物质量浓度在大雨强下先升高后逐渐降低, 中雨强下降低, 小雨强下变化不大, B 泵站前池水质主要受次降水量、前期干旱时间和降雨强度影响; 2 个泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度变化与降雨的响应规律相似, 但更多受到与前期干旱时间关联的地表径流冲刷作用影响; 连续降雨均导致泵站前池氨氮质量浓度和 COD_{Mn} 质量浓度波动变化较大, 而前期干旱时间越长, 降雨发生后泵站前池水质越差。

关键词: 排涝泵站; 降雨特征; 泵站前池水质; 响应关系; 回归树分析方法; 南京秦淮河

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)01-0011-10

Response relationship between water quality and rainfall characteristics in front pond of typical urban drainage pumping stations of Qinhuai River

XU Rong¹, DENG Yajing², LI Yiping², PAN Hongzhe², LIU Jun¹, BAI Song¹,
SHANG Heqin², ZHOU Yuxuan², ZHENG Wanting²

(1. Nanjing Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210041, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To understand the response patterns of water quality in the front pond of drainage pumping station to rainfall characteristics, the high-frequency online automatic monitoring was carried out for water quality and rainfall at two drainage pumping stations along the Qinhuai River in Nanjing City. The regression tree method was used to analyze the variations in the water quality (ammonia nitrogen and COD_{Mn}) of typical urban drainage pumping stations under different rainfall intensities and previous drought duration conditions, and the main influencing factors of water quality for different types of drainage pumping stations were explored. Taking ammonia nitrogen as an example, the concentration in the front pond of drainage pumping station A, which receives the domestic sewage inflow during both rainy and non-rainy days, decreases under heavy rain intensity, increases first and then decreases under moderate rain intensity, and gradually rises under light rain intensity. The water quality concentration in the front pond of drainage pumping station A is mainly affected by the rainfall intensity and secondary rainfall. The water quality concentration in the front pond of drainage pumping station B, which mainly receives the rainfall runoff but also has the inflow of domestic sewage during heavy rainfall, firstly increases and then gradually decreases under heavy rain intensity, decreases under moderate rain intensity, and has little change under light rain intensity. The water quality concentration in the front pond of drainage pumping station B is mainly affected by rainfall, previous drought duration and rainfall intensity. The response patterns of COD_{Mn} concentration to rainfall in the front pond of the two pumping

基金项目: 南京市环保科研课题资助项目(202101); 江苏省环境监测科研基金项目(2101); 国家自然科学基金项目(52039003)

作者简介: 徐荣(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事水环境监测管理研究。E-mail: njhbxurong@163.com

通信作者: 邓雅静(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事溢流污染及其控制研究。E-mail: Ya_Jing_Deng@163.com

引用本文: 徐荣, 邓雅静, 李一平, 等. 秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 11-20.

XU Rong, DENG Yajing, LI Yiping, et al. Response relationship between water quality and rainfall characteristics in front pond of typical urban drainage pumping stations of Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 11-20.

stations is similar, but the concentration of COD_{Mn} is more affected by the surface runoff erosion associated with previous drought duration. Continuous rainfall causes large fluctuations in the concentration of ammonia nitrogen and COD_{Mn} in the front pond of drainage pumping stations, and longer previous drought duration results in worse water quality in the front pond of drainage pumping stations after rainfall events.

Key words: drainage pumping station; rainfall characteristics; water quality in the front pond of pumping station; response relationship; regression tree analysis; Qinhuai River in Nanjing City

江苏地区由于地势低平及圩区的大量修建,雨天涝水大多只能通过管网、内河收集并储存在末端排涝泵站前池,达到防洪水位后开泵强排入河,因而泵站前池水质对河道水质有直接影响。同时,在采用合流制或存在雨污混接的分流制排水系统的地区,由于雨水和污水不能完全分开,造成污染程度较高的雨污混合污水进入泵站前池,排入受纳水体,导致城市水体“下雨就黑”“下雨就超标”^[1-2],尤其是氨氮、溶解氧等指标^[3-4],给城市水体中水质考核断面稳定达标及汛期污染防治工作带来了巨大挑战^[5-6]。因此,掌握排涝泵站前池水质与降雨特征的响应关系,对制定兼顾水安全与水环境的泵站排水管理方案具有重要意义。目前国内外针对不同降雨特征下汇水区降雨径流水质变化情况已有较多研究,包括不同前期干旱时间^[7]、不同降雨历时^[8-9]、不同降雨强度^[10]、不同降水量^[11]带来的降雨径流水质差异化影响。此外,降雨特征对合流制管网溢流污水水质影响的研究也较为广泛,降雨特征的选取主要集中在降水量^[12]、降雨强度^[12-13]、前期干旱时间^[14]等。而对于泵站水质的研究则主要从泵站放江污染特征的角度进行探讨^[15],不同类型城市排涝泵站前池水质与降雨特征的响应关系研究还存在空白,需要进一步深入研究。

在雨污混接分流制区域中,排涝泵站前池收集了汇水区范围内的雨水、降雨径流、混错接污水和部管道沉积物^[15],其中降雨径流携带的污染物量与径流冲刷能力、雨前污染物累积量有关。同时,在降雨径流的冲刷作用下,管道沉积物会重新悬浮,前期沉积富集的大量有机物、营养盐随雨水排入泵站前池^[14,16]。因此,不同降雨特征^[17-18]和泵站汇水区特性均会对前池水质产生影响,亟需精准剖析不同影响因素交织作用下泵站前池水质的响应关系。为此,本文选取南京市秦淮河沿线2种典型排涝泵站(A泵站、B泵站),探究不同降雨强度和前期干旱时间下泵站前池水质变化特征,同时采用回归树分析方法,探讨排涝泵站前池水质的主要降雨特征影响因素,以期为城市排涝泵站排水管理与雨天出流污染控制提供科学决策依据。

1 研究区域和数据

1.1 区域概况

南京市属北亚热带季风气候区,年均降水量为1106.5 mm,汛期(5—9月)雨量占全年总降水量的65%左右。本文选取的排涝泵站A和B分别位于南京市江宁区外秦淮河、秦淮新河岸边,上下游河道旁分布有多个排涝泵站,并设置有3个水质考核断面,泵站位置、汇水范围及现场情况如图1所示,详细信息见表1。



图1 排涝泵站现场及位置

Fig. 1 On-site pictures and location map of drainage pumping stations

表 1 排涝泵站详细信息
Table 1 Details of drainage pumping stations

泵站	汇水面积/km ²	主要用地类型	2021 年排水量/万 m ³	受纳水体	泵站类型
A	3.94	住宅用地、商服用地	257.05	外秦淮河	晴天时均有生活污水汇入 主要接收降雨径流,雨量大时有生活污水溢流汇入
B	3.83	住宅用地、工业用地	305.86	秦淮新河	

A 泵站 2022 年之前,汇水区范围内的合流污水均被截流至 A 污水厂进行处理,由于 A 污水厂长期处于超负荷、高水位运行状态,汇水区范围内的大量合流污水容易漫溢至泵站前池入流河道,降雨时雨水和污水一起汇入泵站前池,超过泵站警戒水位后排入外秦淮河,因此将其视为晴天时均有大量生活污水汇入的排涝泵站。B 泵站前池入流处与汇水区内的雨污合流箱涵连通,前池四周也接有多个雨水排口,晴天时入流污水均被截流至泵站旁边的一体化污水处理设施进行处理(处理能力 0.8 万 t/d),处理后尾水可达到地表水Ⅳ类标准并排入泵站前池蓄积,当降水量较大,上游箱涵入流来水超过前池截流设施截流能力时,部分合流污水便会溢流进入泵站前池(超过泵站警戒水位后排放进入秦淮新河),因此将 B 泵站视为主要接收降雨径流,但雨量大时有少量生活污水溢流汇入的排涝泵站。研究区域河道水质考核断面在降雨过后常出现水质下滑或短时超标现象,沿线排涝泵站的雨天出流排放是重要原因之一。

1.2 数据来源

A 泵站和 B 泵站前池自 2021 年 7 月中旬起布设了微型水质自动监测站,检测指标包括常规五参数(水温、pH 值、溶解氧、电导率、浊度)、氨氮和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),监测频次为 4 h 一次。同时,在 B 泵站内安装了 1 台自动雨量监测设备,监测频次为 5 min 一次,强降雨时加密监测,由此获取长序列的降雨数据。

2 研究方法

利用泵站前池高频水质数据和长序列降雨数据,选取 7 场典型降雨事件和与之对应的泵站前池水质数据,通过 Origin 2021 作图比较 A 泵站、B 泵站前池水质与降雨强度和前期干旱时间的响应规律,选取的场次降雨特征信息见表 2。选取 3 h 作为场次降雨的最小间隔,且场次累计降水量大于 1 mm 为一次降雨事件^[19]。南京市汛期为 5—9 月,降水主要集中在 6—8 月^[20],本文涉及的 7 场降雨事件包括了小雨、中雨、大雨和暴雨 4 种雨型,可认为这 7 场降雨具有代表性和科学性。

表 2 2021 年 7 场降雨事件的特征信息
Table 2 Characteristics of seven rainfall events in 2021

序号	降雨日期	次降水量/mm	降雨历时/h	最大降雨强度/(mm/h)	平均降雨强度/(mm/h)	前期干旱时间/d	降雨类型
1	2021-08-13	55.60	6.5	17.96	8.55	1.88	大雨强
2	2021-08-15	7.73	4.8	3.55	1.61	1.38	中雨强
3	2021-08-29	38.60	2.0	21.97	19.3	2.00	大雨强
4	2021-09-13	1.17	20.0	0.31	0.06	0.08	小雨强
5	2021-09-28	43.77	12.8	31.5	3.43	6.00	大雨强
6	2021-10-14	44.76	6.5	20.55	6.89	0	大雨强
7	2021-12-24	10.21	14.8	1.58	0.69	6.56	小雨强

注:降雨类型根据最大降雨强度划分,≤2.5 mm/h 为小雨强,>2.5 ~ <8.1 mm/h 范围内为中雨强,≥8.1 mm/h 为大雨强。

采用 RStudio 软件中的 rpart 包构建降雨特征参数(次降水量、前期干旱时间、最大降雨强度和平均降雨强度)和泵站前池水质的回归树模型。回归树是一种常用的机器学习算法,它通过不断地选择最优划分特征和划分点,将数据集划分成多个子集,然后在每个子集上继续构建子树,最终形成一个完整的回归树模型。为了避免过拟合,通过交叉验证的方法进行后剪枝,从而获得误差最小的树模型。其中 A 泵站前池水质的回归树分析仅使用了 2021 年的水质及降雨数据,共有 63 个样本,B 泵站前池水质的回归树分析使用了 2021 年和 2022 年的水质及降雨数据,其中氨氮质量浓度共有 113 个样本,COD_{Mn}质量浓度共有 116 个样本。

3 结果与分析

3.1 降雨事件后排涝泵站前池水质变化特征

图 2 为 2021 年 7—8 月 A 泵站、B 泵站前池的氨氮质量浓度、COD_{Mn}质量浓度及 24 h 降水量的监测数

据。降雨后 A 泵站和 B 泵站前池氨氮质量浓度和 COD_{Mn} 质量浓度都有明显的波动。A 泵站在 24 h 降水量大于 50 mm 时,前池的氨氮质量浓度和 COD_{Mn} 质量浓度降低,24 h 降水量小于 50 mm 时,前池的污染物质量浓度升高;B 泵站前池的水质变化情况几乎与 A 泵站相反,此外 B 泵站前池的污染物浓度远低于 A 泵站。由于类型不同,有大量生活污水直接汇入的 A 泵站和有截流设施的 B 泵站前池水质变化和降雨的响应关系也有所不同;对于同一个泵站来说,不同场次降雨的降雨强度、前期干旱时间等特征也影响泵站前池水质变化。

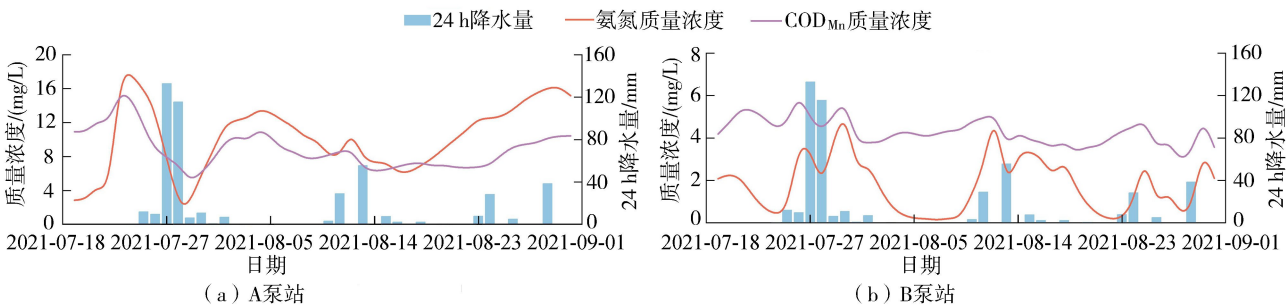


图2 2021年7—8月降雨事件和排涝泵站前池水质变化

Fig.2 Rainfall events and change of water quality in the front pond of drainage pumping station during July-August 2021

3.2 排涝泵站前池水质与降雨强度的关系

由于降雨时产生的地面冲刷、管道冲刷作用以及稀释作用的影响,泵站前池水质在不同等级降雨强度下变化情况不同。针对 A 泵站和 B 泵站分别选取 3 场降雨进行降雨强度和泵站前池水质响应关系分析,A 泵站选取的降雨事件序号为 1、2、7,B 泵站选取的降雨事件序号为 5、2、4(按大、中、小雨强排序)。

由图 3 可知,A 泵站大雨强下前池污染物质量浓度呈下降趋势,氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度分别降低了 8.6 mg/L 和 2.1 mg/L,降雨结束 24 h 后氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度逐渐上升;中雨强下泵站前池污染物质量浓度呈先升高后降低趋势,氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度分别升高了 4.9 mg/L 和 4.2 mg/L,水质峰值比降雨强度峰值滞后 3 h;小雨强下泵站前池水质呈平缓上升趋势,氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度分别在达到 15.6 mg/L 和 9.0 mg/L 后基本稳定,水质峰值比降雨强度峰值滞后 13 h,泵站前池水质在大、中、小雨强下均为劣 V 类。B 泵站大雨强下前池污染物浓度急剧上升,氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度分别升高了 4.3 mg/L 和 1.9 mg/L,水质峰值比降雨强度峰值滞后 4~20 h,降雨结束 12 h 后泵站前池污染物质量浓度逐渐降低并达到稳定;中雨强下泵站前池污染物质量浓度呈下降趋势,氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度分别降低了 3.3 mg/L 和 2.0 mg/L,降雨结束后水质达到稳定;小雨强下泵站前池污染物质量浓度有略微下降的现象,但总体变化不明显,水质保持在Ⅲ类和Ⅳ类。

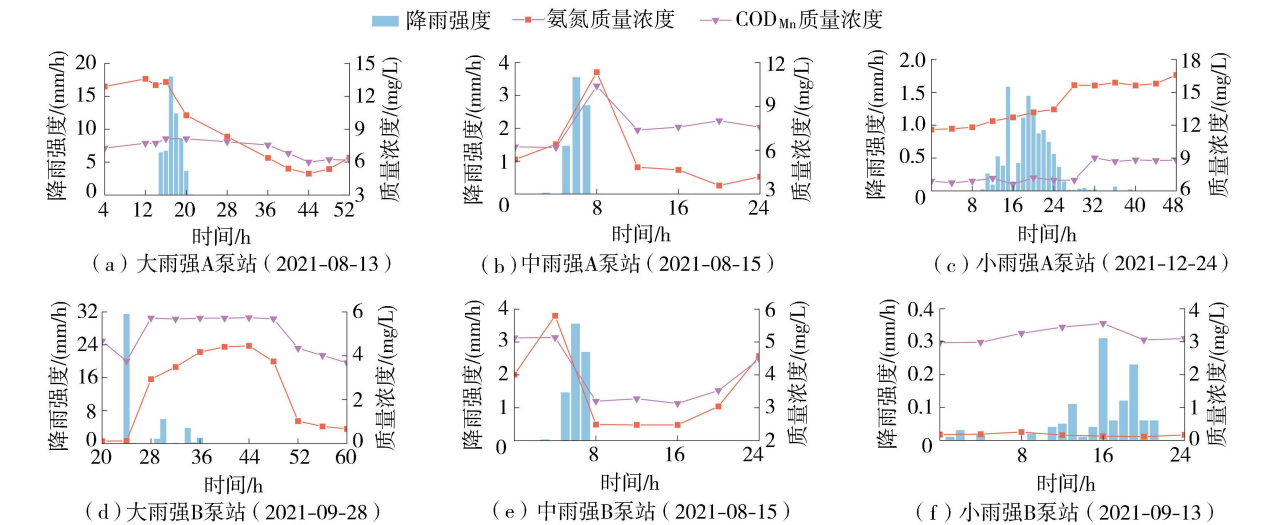


图3 排涝泵站前池水质与降雨强度响应关系

Fig.3 Relationship between water quality in the front pond of drainage pumping station and rainfall intensity

对比分析 A 泵站和 B 泵站,发现大雨强和中雨强条件下两泵站前池的水质变化呈现截然相反的现象。对于 A 泵站,大雨强虽然会将大量下垫面污染物和管道沉积物冲刷进泵站前池,但由于汇入泵站的水量在

短时间内迅速增加,并且 A 泵站前池水质初始浓度较高,更容易受到雨水稀释作用的影响^[13],从而导致泵站前池污染物质量浓度下降,之后由于生活污水的汇入污染物质量浓度又逐渐上升。而前期水质较好的 B 泵站则更容易受到大雨强下强烈的下垫面冲刷^[8]、管道沉积物冲刷^[21]和生活污水直接汇入的影响,进而导致泵站前池污染物浓度升高。中雨强条件下,A 泵站降雨前期下垫面冲刷和管道冲刷作用占优,泵站前池污染物浓度增加;降雨后期,冲刷作用带来的污染物减少,泵站前池污染物质量浓度逐渐降低并达到稳定。而 B 泵站在中雨强下前池污染物质量浓度下降,是因为生活污水和部分初期雨水被截留处理,进入泵站前池的径流雨水中携带的下垫面和管道冲刷污染物减少,并且降雨对泵站前池内的污染物具有稀释作用。小雨强下,地表径流缓慢甚至不形成地表径流^[17],管道沉积物的冲刷作用也不够显著^[21],因此 A 泵站前池污染物质量浓度随着雨水和污水的汇入而逐渐上升并稳定,B 泵站无污水汇入,泵站前池水质不会发生明显变化。

此外,已有研究表明合流制管网溢流污水的污染物波峰比降雨强度峰值滞后 10 ~ 45 min^[13],然而降雨形成地表径流进入管网再汇入泵站前池需要一定的时间,因此 A 泵站前池水质峰值滞后于降雨强度峰值 3 ~ 13 h,相比于合流制管网末端排口滞后时间更长。

3.3 排涝泵站前池水质与前期干旱时间的关系

图 4 为不同前期干旱时间下,雨后一周内 A 泵站和 B 泵站前池污染物质量浓度的变化情况。3 种前期干旱时间分别为连续降雨、前期干旱 2 d 和前期干旱 6 d,对应的降雨事件序号为 6、3、5。3 场降雨事件的次降水量均在 35 ~ 45 mm 之间,两排涝泵站均有生活污水溢流汇入,最大程度减少其他因素的干扰,只考虑前期干旱时间对泵站前池水质的影响。

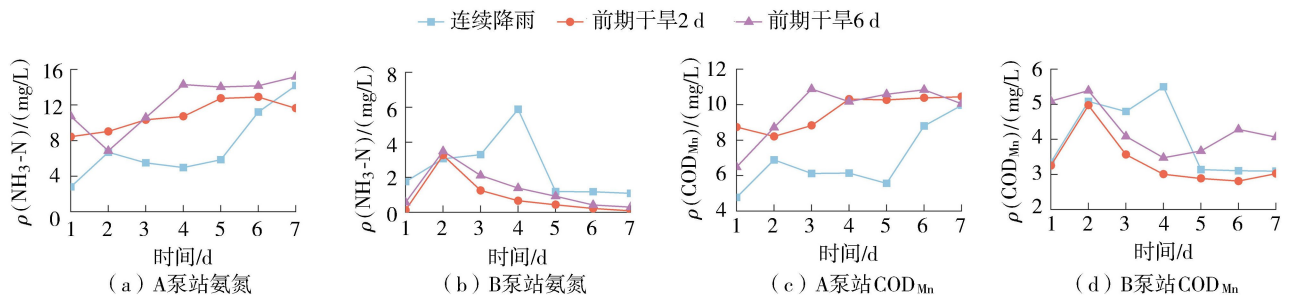


图 4 不同前期干旱时间下排涝泵站前池水质的变化

Fig. 4 Change of water quality in the front pond of drainage pumping station under different previous drought duration

由图 4 可知,A 泵站作为晴雨天均有生活污水汇入的排涝泵站,泵站前池氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度在雨后 1 周内总体呈升高趋势;B 泵站由于汇入了超量的溢流生活污水,泵站前池氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度在雨后 1 周内先上升后逐渐降低。连续降雨时 A 泵站和 B 泵站前池污染物质量浓度变化最为明显,这是因为 A 泵站在前期受到雨水的稀释作用,前池污染物质量浓度处于偏低状态,后期雨量渐小,生活污水的汇入使 A 泵站前池污染物质量浓度逐渐回升;而 B 泵站前池由于连续受到下垫面和管道冲刷效应影响,且超量的生活污水持续溢流进入泵站前池,从而导致 B 泵站前池污染物质量浓度在降雨前期持续上升,后期降水量逐渐减少,生活污水被截流处理、冲刷效应减弱,污染物质量浓度迅速降低。

前期干旱时间为 6 d 时,雨后 1 周内 A 泵站和 B 泵站前池氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度基本高于前期干旱时间为 2 d 时的质量浓度,这是因为在生活污水汇入量一定时,前期干旱时间越长,下垫面污染物和管道沉积物累积程度越高,降雨时冲刷进入泵站前池的污染量也随之增加。这与方燕等^[22]关于不同降雨间歇期下雨污混接分流制区域河道水质的变化研究结论相同,连续降雨天气和长降雨间歇期导致雨后河水污染物质量浓度变化较大,泵站前池水质也呈现同样的变化特征。

总体来说,前期干旱时间可以用来表征雨前污染物的累积程度,前期干旱时间越长,污染物累积程度越高,并且主要体现在下垫面和管道沉积物的冲刷效应上,从而影响泵站前池水质。连续降雨天气下,降雨冲刷下垫面和径流冲刷管道沉积物的现象不间断导致泵站前池水质受影响程度累加,但冲刷效应在后期逐渐减弱,对泵站前池水质的影响也不再显著。

3.4 排涝泵站前池水质影响因素综合判别

3.4.1 A 泵站前池水质影响因素剖分

如图 5 所示,回归树得出了 2 个 A 泵站前池氨氮质量浓度的主要影响因素,分别是平均降雨强度和次降

水量,不同影响因素下泵站前池污染物质量浓度范围见表3。A 泵站前池氨氮质量浓度主要受到平均降雨强度的影响,当平均降雨强度大于或等于 30.345 mm/h 时,短时间内有大量雨水汇入,稀释占主导作用,平均降雨强度越大,泵站前池氨氮质量浓度越小。平均降雨强度小于 30.345 mm/h 时,下垫面和管网的冲刷作用对泵站前池水质产生更多影响,且次降水量越大,泵站前池氨氮质量浓度越大。

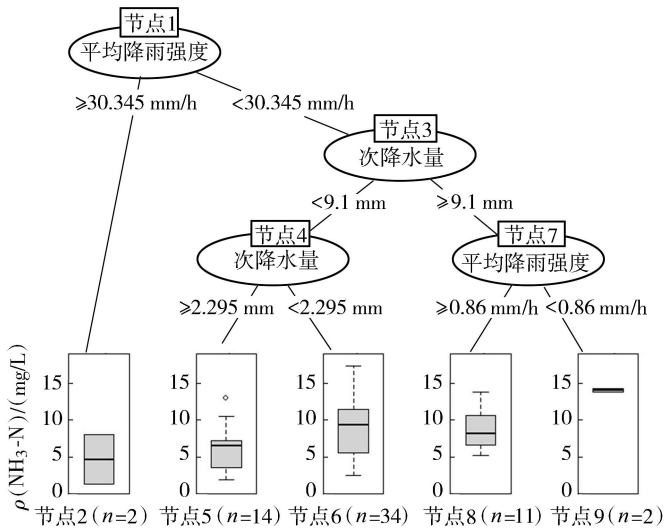


图5 A 泵站前池氨氮质量浓度的回归树分析(样本数 $n=63$)

Fig. 5 Regression tree analysis of ammonia nitrogen concentration in the front pond of drainage pumping station A ($n=63$)

表3 A 泵站前池在不同影响因素下的污染物质量浓度

Table 3 Pollutant concentration in the front pond of drainage pumping station A under different factors

水质指标	最大降雨强度/(mm/h)	平均降雨强度/(mm/h)	次降水量/mm	前期干旱时间/d	质量浓度均值/(mg/L)
氨氮		≥30.345			4.6
		<30.345	2.295~9.1		6.4
		<30.345	<2.295		8.9
		0.86~30.345	≥9.1		8.9
		<0.86	≥9.1		14.0
COD _{Mn}	<6.77	≥5.61			5.5
	<6.77	<5.61			6.6~8.2
	≥6.77			≥2	7.5
	≥6.77			<2	9.6

如图6所示,A 泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度的影响因素有4个,分别是最大降雨强度、平均降雨强度、前期干旱时间和次降水量,不同影响因素下泵站前池污染物质量浓度范围见表3。当最大降雨强度大于或等于 6.77 mm/h 时,前期干旱时间是泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度的主要影响因素,COD_{Mn} 质量浓度均值范围为 7.5~9.6 mg/L,前期干旱时间小于 2 d 时泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度平均值更高,是因为短时间内频繁降水时的降水量较少,对生活污水的稀释作用较弱。

3.4.2 B 泵站前池水质影响因素剖分

和 A 泵站不同的是,次降水量、前期干旱时间、最大降雨强度和平均降雨强度是 B 泵站前池氨氮浓度的主要影响因素,不同影响因素下泵站前池污染物质量浓度范围见表4。如图7所示,在次降水量小于 6.48 mm 条件下,前期干旱时间是 B 泵站前池氨氮质量浓度的主要影响因素,前期干旱时间小于 1.5 d 时,泵站前池水质受上一场降雨的累加影响,氨氮质量浓度较高。当次降水量大于或等于 6.48 mm 时,最大降雨强度为泵站前池氨氮质量浓度的首要影响因素,最大降雨强度大于或等于 5.825 mm/h 时,随着平均降雨强度的增加,降雨的稀释作用占优,泵站前池氨氮质量浓度降低,平均值为 0.9 mg/L;最大降雨强度小于 5.825 mm/h 时,降雨对下垫面和管道沉积物的冲刷作用最明显,氨氮质量浓度最高,平均值为 4.5 mg/L。

B 泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度的影响因素有3个,分别是平均降雨强度、前期干旱时间和次降水量,不同影响因素下泵站前池污染物质量浓度范围见表4。如图8所示,在平均降雨强度大于或等于 0.48 mm/h 条

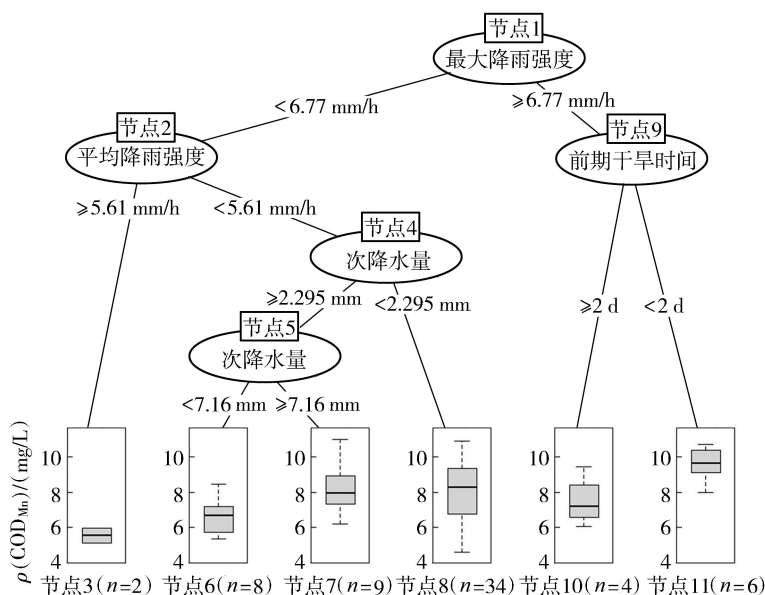


图 6 A 泵站前池 COD_{Mn}质量浓度的回归树分析 (n=63)

Fig. 6 Regression tree analysis of COD_{Mn} concentration in the front pond of drainage pumping station A (n=63)

表 4 B 泵站前池在不同影响因素下的污染物质量浓度

Table 4 Pollutant concentration in the front pond of drainage pumping station B under different factors					
水质指标	次降水量/mm	最大降雨强度/(mm/h)	平均降雨强度/(mm/h)	前期干旱时间/d	质量浓度均值/(mg/L)
氨氮	<6.48				0.7 ~ 1.8
	≥6.48	≥5.825	≥30.345		0.9
	≥6.48	≥5.825	<30.345		1.8 ~ 3.4
	≥6.48	<5.825			4.5
COD _{Mn}			<0.48		3.8
			≥0.48	<17.5	4.5 ~ 6.2
			≥0.48	≥17.5	8.2

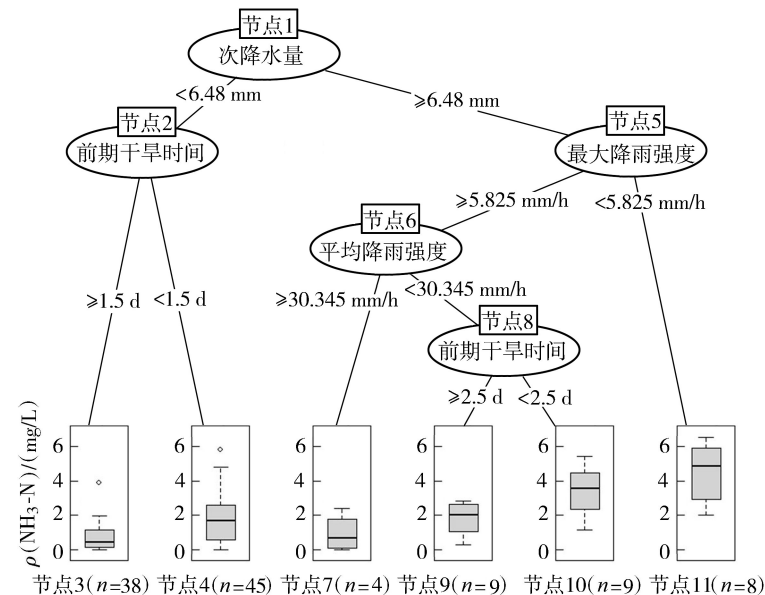


图 7 B 泵站前池氨氮质量浓度的回归树分析 (n=113)

Fig. 7 Regression tree analysis of ammonia nitrogen concentration in the front pond of drainage pumping station B (n=113)

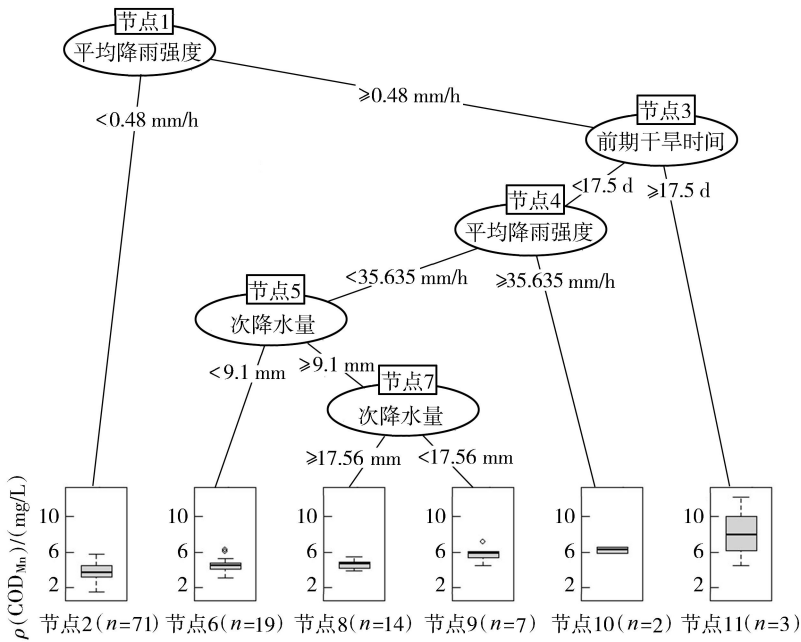


图 8 B 泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度的回归树分析 (n=116)

Fig. 8 Regression tree analysis of COD_{Mn} concentration in the front pond of drainage pumping station B (n=116)

件下,前期干旱时间是泵站前池 COD_{Mn} 质量浓度的主要影响因素,前期干旱时间小于 17.5 d 时,次降水量对 COD_{Mn} 的影响较小;前期干旱时间大于或等于 17.5 d 时,COD_{Mn} 质量浓度均值为 8.2 mg/L,前期干旱时间越长,污染物累积程度越高,被冲刷进入泵站前池的污染量也越多。

3.4.3 排涝泵站前池水质影响因素与出流污染控制方式探讨

在已有研究中,Perera 等^[11]研究认为前期干旱时间、平均降雨强度和降雨事件前的流量是影响合流制溢流污水最大 COD_{Mn} 质量浓度的 3 个主要因素。李哲等^[17]发现次降水量是影响径流冲刷能力的主要因素,而降雨强度是相对次要因素。以上影响因素及其重要性程度与本研究所得结论较为一致,表明本研究中排涝泵站的前池收水与合流制排水系统末端出流具有一定相似性。

对比 A 泵站和 B 泵站前池氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度的回归树分析结果,A 泵站由于始终存在大量生活污水汇入,降雨强度和次降水量是泵站前池水质的主要影响因素,说明降雨导致的冲刷作用和稀释作用均对泵站前池水质波动有较为明显的影响。尽管在雨强较大时稀释作用会导致泵站前池污染物浓度的下降,但同时期汇入前池的污染负荷也会显著增加,排入受纳水体后仍然会对河道水质造成较大影响^[23]。

B 泵站前池水质的主要影响因素是次降水量、前期干旱时间和降雨强度,说明 B 泵站汇水范围内的下垫面及管道污染物累积程度对泵站前池水质也有影响,也表明对于 B 泵站这种以接收雨水径流为主的泵站,降雨冲刷作用对前池水质的影响大于稀释作用^[24]。但当降水量大于泵站前池一体化处理设施的截流处理能力时,雨污混流的入流污水仍然是导致泵站前池污染物质量浓度上升的重要原因。

进一步分析泵站前池氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度的影响因素,发现排涝泵站 A 和 B 前池 COD_{Mn} 质量浓度与降雨的响应规律相似,相比于氨氮质量浓度,COD_{Mn} 质量浓度受降雨强度和前期干旱时间的影响更为明显。这是因为下垫面污染物中的 COD 主要赋存于颗粒物中并随径流迁移^[25],同时 Yu 等^[26]对合流制管道中的沉积物检测发现合流制排水系统的颗粒态 COD 负荷大于溶解态 COD 负荷,因此当降雨强度越大、前期干旱时间越长时,下垫面和管道沉积物中积累的颗粒物更易被冲刷进入泵站前池,颗粒物中赋存的 COD 量也更多。

现状城市排涝泵站的调度管理中,由于对泵站前池水质影响因素作用机制及影响因素了解的缺失,难以根据降雨条件预判并科学制定管理调控方案,降雨发生后,河道水质下滑超标现象仍然较为突出^[27]。针对 A 泵站这类晴天均存在生活污水汇入的排涝泵站,首要任务是对入流污水进行有效截流、处理,并通过系统调蓄^[28]、调峰填谷等措施降低汇水区内排水系统运行水位^[29],提升排水系统韧性,避免晴天生活污水汇入并尽量减少小、中雨条件下混流雨污水的入流量^[30]。针对 B 泵站这类以接收雨水径流为主、间断性存在生活污水汇入的泵站,应合理利用前池调蓄能力,在降雨来临前开泵预降水位,增大降雨期间的混流污水截

流量。同时,在条件允许情况下,增大前池入流污水一体化设施的处理能力与应急调蓄能力,尽可能减少雨天污水溢流进入泵站前池并排放至受纳水体现象的发生^[31]。

4 结 论

- a. 不同降雨强度下不同类型排涝泵站前池水质变化规律不同。晴雨天均有生活污水汇入的 A 泵站前池氨氮和 COD_{Mn}质量浓度在大雨强下分别降低 8.6 mg/L 和 2.1 mg/L,在中雨强下先升高后降低,在小雨强下先平缓上升后基本不变,泵站前池水质在大、中、小雨强下均为劣 V 类;主要接收降雨径流但雨量大时有生活污水溢流汇入的 B 泵站前池氨氮和 COD_{Mn}质量浓度在大雨强下先升高后逐渐降低,在中雨强下分别降低了 3.3 mg/L 和 2.0 mg/L,在小雨强下变化不大,水质保持在Ⅲ类、Ⅳ类。
- b. 不同前期干旱时间下排涝泵站前池水质变化规律不同。连续降雨天气使雨后泵站前池氨氮和 COD_{Mn}质量浓度波动变化较大,前期干旱时间越长,降雨发生后泵站前池水质越差。晴雨天均有生活污水汇入的泵站前池污染物质量浓度在雨后一周内总体呈升高趋势,主要接收降雨径流但雨量大时有生活污水溢流汇入的泵站前池污染物质量浓度在雨后一周内呈先上升后逐渐降低的趋势。
- c. 不同类型排涝泵站前池水质影响因素不同。晴雨天均有生活污水汇入的泵站前池水质主要受降雨强度和次降水量影响,主要接收降雨径流但雨量大时有生活污水溢流汇入的泵站前池水质主要受次降水量、前期干旱时间和降雨强度影响。
- d. 针对晴雨天均存在生活污水混入的排涝泵站,污水截流、降低管网系统运行水位是改善前池水质最首要的任务;针对以接收雨水径流为主、间断性存在生活污水汇入的排涝泵站,合理调蓄、预降水位、增大入流污水处理调蓄能力,是避免溢流现象发生、提升前池水质的重要措施。

参考文献:

[1] 谭琼. 合流制泵站水安全与水环境“两水平衡”运行对策探讨[J]. 给水排水,2022,58(1):39-44. (TAN Qiong. Study on the operational strategy of pumping station to balance flooding control and receiving water quality protection[J]. Water & Wastewater Engineering,2022,58(1):39-44. (in Chinese))

[2] 刘远航,杜晓荣. 湖长制对水质提升的政策效应研究[J]. 水利经济,2022,40(1):29-33. (LIU Yuanhang, DU Xiaorong. Policy effects of Lake Chief System on improvement of water quality[J]. Journal of Economics of Water Resources,2022,40(1):29-33. (in Chinese))

[3] RIECHEL M, MATZINGER A, PAWLOWSKY-REUSING E, et al. Impacts of combined sewer overflows on a large urban river—understanding the effect of different management strategies[J]. Water Research,2016,105:264-273.

[4] 韩啸,陶红,李飞鹏,等. 雨污分流制泵站旱天放江后上游调水对受纳河道水质的影响[J]. 净水技术,2020,39(1):130-135. (HAN Xiao, TAO Hong, LI Feipeng, et al. Influence of upstream water diversion on water quality of receiving river after drainage in dry weather from pumping station of rain and sewage separate system[J]. Water Purification Technology,2020,39(1):130-135. (in Chinese))

[5] 中华人民共和国中央人民政府. 生态环境部印发通知要求各地加强 2022 年汛期水环境监管工作[EB/OL]. [2023-03-07]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-05/28/content_5692808.htm

[6] 王婷,仇蕾,汪志强,等. 基于改进 DIIM 的洪涝灾害下供应链系统中断关联型损失评估研究[J]. 水利经济,2023,41(4):88-93. (WANG Ting, QIU Lei, WANG Zhiqiang, et al. Research on economic loss assessment of supply chain disruption under flood disaster based on improved DIIM[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(4):88-93. (in Chinese))

[7] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学,2007,28(10):2287-2293. (LI Liqing, YIN Chengqing, KONG Lingli, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load[J]. Environmental Science,2007,28(10):2287-2293. (in Chinese))

[8] 何庆慈,李立青,孔玲莉,等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水,2005,21(2):101-103. (HE Qingci, LI Liqing, KONG Lingli, et al. Characteristics of storm runoff pollution in Hanyang District of Wuhan City[J]. China Water & Wastewater,2005,21(2):101-103. (in Chinese))

[9] 王建龙,彭柳苇,张敬玉,等. 降雨特征对半透水道路径流系数的影响[J]. 水资源保护,2022,38(3):96-101. (WANG Jianlong, PENG Liuwei, ZHANG Jingyu, et al. Influences of rainfall characteristics on runoff coefficient of semi-permeable roads [J]. Water Resources Protection,2022,38(3):96-101. (in Chinese))

- [10] JUNG J, PARK H, YOON K, et al. Event mean concentrations (EMCs) and first flush characteristics of runoff from a public park in Korea[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2013, 56(5): 597-604.
- [11] PERERA T, MCGREE J, EGODAWATTA P, et al. Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2019, 166: 115075.
- [12] 海永龙, 佃柳, 郁达伟, 等. 降雨特征对合流制管网溢流污染的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3082-3091. (HAI Yonglong, DIAN Liu, YU Dawei, et al. Effect of rainfall on the pollution characteristics of combined sewer overflows[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3082-3091. (in Chinese))
- [13] 李思远, 管运涛, 陈俊, 等. 苏南地区合流制管网溢流污水水质特征分析[J]. 给水排水, 2015, 51(增刊1): 344-348. (LI Siyuan, GUAN Yuntao, CHEN Jun, et al. Water quality characteristics of combined sewer overflows in southern region of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(Sup1): 344-348. (in Chinese))
- [14] BERSINGER T, BAREILLE G, PIGOT T, et al. Online monitoring and conditional regression tree test: useful tools for a better understanding of combined sewer network behavior[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 336-343.
- [15] 徐连军, 张善发. 上海中心城区泵站放江溢流污染影响因子分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(18): 42-45. (XU Lianjun, ZHANG Shanfa. Analysis on influence factors of river discharge overflow pollution from pumping station in downtown Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18): 42-45. (in Chinese))
- [16] LI Y, ZHOU Y, WANG H, et al. Characterization and sources apportionment of overflow pollution in urban separate stormwater systems inappropriately connected with sewage[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 303: 114231.
- [17] 李哲, 周毅, 吴丽珍, 等. 以径流污染为指标的降雨重要性分类[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 110-115. (LI Zhe, ZHOU Yi, WU Lizhen, et al. Rainfall importance classification based on runoff Pollution[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 110-115. (in Chinese))
- [18] 佃柳, 郑祥, 郁达伟, 等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 76-94. (DIAN Liu, ZHENG Xiang, YU Dawei, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 76-94. (in Chinese))
- [19] 于志慧, 刘鹏飞, 何玉秀, 等. 太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 2134-2143. (YU Zhihui, LIU Pengfei, HE Yuxiu, et al. Temporal and spatial variation of rainfall characteristics under high urbanization in the Lake Taihu Plain[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6): 2134-2143. (in Chinese))
- [20] 陈圣劼, 尹东屏, 李玉涛, 等. 南京地区城郊降雨差异特征分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 27-33. (CHEN Shengjie, YIN Dongping, LI Yutao, et al. Analysis of differences of rainfall between urban and rural regions in Nanjing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(6): 27-33. (in Chinese))
- [21] 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 919-926. (LI Haiyan, XU Boping, XU Shangling, et al. Research on pollution load of sediments in storm sewer in Beijing District[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 919-926. (in Chinese))
- [22] 方燕, 傅大康, 李继红, 等. 雨污混接分流制区域河道水质与降雨事件的响应关系[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 107-113. (FANG Yan, FU Dakang, LI Jihong, et al. Relationship between river water quality and rainfall events in separate system with mixing of rainwater and sewage[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 107-113. (in Chinese))
- [23] 王静怡. 泵站雨天放江污染特征及负荷定量化研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3): 84-87. (WANG Jingyi. Study on characteristics of wet-weather discharge and pollution loads from typical separate drainage pumping station[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(3): 84-87. (in Chinese))
- [24] 窦月芹, 吴涓, 陈众, 等. 合肥春季雨水径流污染过程及特征分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 86-90. (DOU Yueqin, WU Juan, CHEN Zhong, et al. Spring rain runoff pollution process and its characteristics analysis in Hefei City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 86-90. (in Chinese))
- [25] 吴攀. 典型下垫面雨水径流颗粒污染物粒径分布特征研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [26] YU D, DIAN L, HAI Y, et al. Effect of rainfall characteristics on the sewer sediment, hydrograph, and pollutant discharge of combined sewer overflow[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 303: 114268.
- [27] 徐连军, 周啸, 林琳, 等. 基于降雨因子的泵站放江量预测研究[J]. 给水排水, 2022, 58(增刊1): 11-16. (XU Lianjun, ZHOU Xiao, LIN Lin, et al. Predicting released water volume of drainage pumping stations by rainfall factors[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(Sup1): 11-16. (in Chinese))

Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))

[16] 李琼芳, 许树洪, 周正模, 等. 基于系统微分响应的暴雨强度公式参数优化[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 8-16. (LI Qiongfang, XU Shuhong, ZHOU Zhengkai, et al. Parameter optimization of rainstorm intensity formula based on system differential response method[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 8-16. (in Chinese))

[17] RAZAVI S, TOLSON B A, BURN D H. Review of surrogate modeling in water resources[J]. Water Resources Research, 2012, 48(7): 2011WR011527.

[18] SYBERFELDT A, GRIMM H, NG A, et al. A parallel surrogate-assisted multi-objective evolutionary algorithm for computationally expensive optimization problems[C]// 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence). Hong Kong: IEEE, 2008: 3177-3184.

[19] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 基于代理模型的水文模型参数多目标优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 36-45. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Multi-objective optimization for hydrological models using surrogate modeling[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 36-45. (in Chinese))

[20] KOURAKOS G, MANTOGLOU A. Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management[J]. Journal of Hydrology, 2013, 479: 13-23.

[21] TODINI E. New trends in modelling soil processes from hillslope to GCM scales [C]// OLIVER H R, OLIVER S A. The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change. Berlin: Springer, 1995: 317-347.

[22] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[23] ZHOU J, ZHAO X, ZHANG X, et al. Task allocation for multi-agent systems based on distributed many-objective evolutionary algorithm and greedy algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 19306-19318.

[24] GONG W, DUAN Q, LI J, et al. Multi-objective adaptive surrogate modeling-based optimization for parameter estimation of large, complex geophysical models[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 1984-2008.

[25] 陈镔, 唐煜. 好格子点法设计的进一步研究[J]. 中国科学: 数学, 2020, 50(5): 585-598. (CHEN E, TANG Yu. Further research on the good lattice point design[J]. Scientia Sinica(Mathematica), 2020, 50(5): 585-598. (in Chinese))

[26] 何志昆, 刘光斌, 赵曦晶, 等. 高斯过程回归方法综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1121-1129. (HE Zhikun, LIU Guangbin, ZHAO Xijing, et al. Overview of Gaussian process regression[J]. Control and Decision, 2013, 28(8): 1121-1129. (in Chinese))

[27] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.

[28] 邓鹏, 李致家, 刘志雨. 分布式 TOPKAPI 模型的数值解法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 158-161. (DENG Peng, LI Zhijia, LIU Zhiyu. Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 158-161. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-08-18 编辑: 刘晓艳)

(上接第 20 页)

[28] 于磊, 黄瑞晶, 李容, 等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 41-48. (YU Lei, HUANG Ruijing, LI Rong, et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 41-48. (in Chinese))

[29] 李俊奇, 周金成, 杨正, 等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 124-131. (LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 124-131. (in Chinese))

[30] 康丽娟, 曹勇. 连续降雨条件下典型泵站放江污染特征分析[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 20-26. (KANG Lijuan, CAO Yong. Effects of sewage discharge from drainage pumping station on receiving river water quality under the condition of continuous rainfall[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(2): 20-26. (in Chinese))

[31] 顾一鸣, 马艳. 防汛泵站放江污染削减对策探索[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 138-143. (GU Yiming, MA Yan. Discussion on the countermeasures of discharge pollution reduction in stormwater pumping station[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 138-143. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-03-17 编辑: 刘晓艳)